

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JÉSSICA SILVA ROCHA PINHO

**ANÁLISE DE FALHA DE UM COMPONENTE METÁLICO
AERONÁUTICO ASSOCIADA A UM ESTUDO DE MELHORIA DE
PROCESSO**

São José dos Campos

2021

JÉSSICA SILVA ROCHA PINHO

**ANÁLISE DE FALHA DE UM COMPONENTE METÁLICO
AERONÁUTICO ASSOCIADA A UM ESTUDO DE MELHORIA DE
PROCESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo C. Campanelli

Coorientadora: Profa. Dra. Danieli A. P. Reis

São José dos Campos

2021

JÉSSICA SILVA ROCHA PINHO

**ANÁLISE DE FALHA DE UM COMPONENTE METÁLICO AERONÁUTICO
ASSOCIADA A UM ESTUDO DE MELHORIA DE PROCESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Leonardo Contri Campanelli

Universidade Federal de São Paulo

Orientador

Prof^a. Dr^a. Danieli Aparecida Pereira Reis

Universidade Federal de São Paulo

Coorientador

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli

Universidade Federal de São Carlos

Na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei de direitos autorais nº 9610/98, autorizo a publicação livre e gratuita desse trabalho no Repositório Institucional da UNIFESP ou em outro meio eletrônico da instituição, sem qualquer ressarcimento dos direitos autorais para leitura, impressão e/ou download em meio eletrônico para fins de divulgação intelectual, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNIFESP São José dos Campos com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pinho, Jessica Silva Rocha.

Análise de falha de um componente metálico aeronáutico associada a um estudo de melhoria de processo/ Jéssica Silva Rocha Pinho. 2021.
46 p.

Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, 2021.

Orientador: Leonardo Contri Campanelli.

1. Análise de falha. 2. Liga metálica. 3. Componente aeronáutico. 4. Melhoria de processo. I. Campanelli, Leonardo Contri. II. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia. III. Análise de falha de um componente metálico aeronáutico associada a um estudo de melhoria de processo.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me conceder saúde, sabedoria e perseverança para desenvolver as atividades de todos os projetos em que participo. Além disso, por me trilhar nos caminhos corretos da vida e me proporcionar pequenas e grandes conquistas.

Agradeço à minha família por todo apoio que me deram em todas as escolhas da minha vida e em especial à escolha de cursar Engenharia de Materiais, me tornando a primeira engenheira da família. Agradeço aos meus pais, Gerson Rocha Pinho e Simone Gonçalves Silva Rocha Pinho, por sempre me incentivarem, acreditarem no meu potencial e por todo o esforço realizado para conquistar os recursos financeiros necessários a serem investidos em minha educação.

Agradeço aos meus orientadores Leonardo Contri Campanelli e Danieli Aparecida Pereira Reis primeiramente por me aceitarem a desenvolver este trabalho e por toda a orientação, dedicação e paciência. Agradeço por sempre me fazerem pensar, refletir e questionar os resultados obtidos, me auxiliando a desenvolver os meus conhecimentos técnicos e me moldando para ser uma profissional melhor. E por fim, por serem excelentes profissionais e pessoas inspiradoras.

Agradeço à Universidade Federal de São Paulo e a todo o corpo docente pelo elevado comprometimento e qualidade do ensino oferecido, disponibilizando conhecimentos técnicos e práticos ao longo da minha trajetória acadêmica que serviram de base para todo o meu conhecimento de hoje. Ademais, aos colegas de turma pelo convívio, pelos momentos felizes, pela troca de experiências e cooperação mútua durante esse período.

Por fim, agradeço à todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para minha formação e conclusão deste trabalho.

RESUMO

De uma forma geral, componentes mecânicos de máquinas estão sujeitos a esforços estáticos e dinâmicos ao longo da vida útil do equipamento, podendo levá-los à fratura caso haja falta de manutenção, erros de projeto, processo de fabricação da peça inadequado, dentre outros motivos. A fratura é irreversível e consequência da propagação de uma falha que se encontra num estágio mais avançado. Um meio para prevenir a futura ocorrência de fratura é realizar a análise de falha de equipamentos já fraturados, em que por meio de um trabalho investigativo determina-se a causa raiz que culmina na fratura. Dessa forma, a análise de falha tem sua importância como medida de prevenção a danos irreversíveis de equipamentos e acidentes catastróficos. O presente trabalho teve como objetivo realizar a análise de falha de um compressor de turbojato, aplicado na indústria aeronáutica, fraturado durante a etapa de testes laboratoriais realizados antes da sua aplicação e operação, e desta forma propor uma melhoria de processo para evitar a ocorrência repetida da fratura do mesmo componente posteriormente fabricado. Em mãos dos resultados obtidos das análises visual e fractográfica, em estereomicroscópio e microscópio eletrônico de varredura (MEV), determinou-se que o componente falhou por fadiga em razão da elevada rugosidade superficial existente na peça. Dessa forma, a melhoria de processo para prevenção da ocorrência da falha é a realização do tratamento superficial de *shot peening* após o processo de usinagem para que haja o encruamento superficial da peça e a indução de tensões residuais de compressão que dificultam o processo de nucleação e propagação de trincas por fadiga.

Palavras-chaves: Análise de falha. Componente aeronáutico. Fadiga. Rugosidade. Shot Peening.

ABSTRACT

In general, mechanical components of machines are subject to static and dynamic stresses throughout the life of the equipment and may lead to fracture if there is a lack of maintenance, design errors, manufacturing process of the improper part, among other reasons. The fracture is irreversible and a consequence of the spread of a fault that is at a more advanced stage. One means to prevent the future occurrence of fracture is to perform the failure analysis of already fractured equipment, in which through an investigative work determines the root cause that culminates in the fracture. Thus, failure analysis has its importance as a measure to prevent irreversible equipment damage and catastrophic accidents. The present work aimed to perform the failure analysis of a turbojet compressor, applied in the aeronautical industry, fractured during the stage of laboratory tests performed before its application and operation, and thus propose a process improvement to avoid the repeated occurrence of the fracture of the same component later manufactured. In the hands of the results obtained from visual and fractographic analyses, in stereomicroscope and scanning electron microscope (SEM), it was determined that the component failed due to fatigue due to the high surface roughness existing in the piece. Thus, the improvement of the process to prevent the occurrence of failure is the realization of the superficial treatment of *shot peening* after the machining process so that there is the surface crucization of the part and the induction of residual compression stresses that hinder the process of nucleation and propagation of cracks by fatigue.

Keywords: Failure analysis. Aeronautical component. Fatigue. Roughness. Shot Peening.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático dos estágios que compõem o compressor.	15
Figura 2 – Estágio do compressor a ser analisado no presente trabalho.	15
Figura 3 - Diagrama tensão – deformação de engenharia típico de metais.	19
Figura 4 - Curva S-N: Representação da vida em fadiga de um material metálico.	20
Figura 5 - (a) Fratura dúctil do aço SAE 1020 recozido; (b) Fratura transgranular do aço SAE 1020.	22
Figura 6 - Fratura intergranular do aço 1050.	23
Figura 7 - Fratura mista do aço inox AISI 304 após ensaio de fadiga.	23
Figura 8 - Modos de carregamentos e propagação de trincas.	25
Figura 9 - Fluxograma das atividades experimentais.	30
Figura 10 – Compressor de turbojato conforme recebido.	32
Figura 11 – Análise visual do compressor de turbojato.	33
Figura 12 – Superfícies de fratura.	34
Figura 13 – Superfície de fratura da palheta, analisada por estereomicroscópio.	35
Figura 14 – Superfície de fratura da palheta, obtida via MEV.	36
Figura 15 – Acabamento superficial da palheta fraturada.	37
Figura 16 – Estrias de fadiga.	37
Figura 17 – Estágio de propagação de trincas por fadiga.	39
Figura 18 – Superfície metálica após realização do shot peening.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das ligas de alumínio fundidas e trabalháveis.....	16
Tabela 2 - Atividades envolvidas numa análise de falha.....	26
Tabela 3 - Cronograma das atividades.	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFC	Cúbica de Face Centrada
HC	Hexagonal Compacta
KV	Kilovolt
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UNIFESP	Universidade Federal de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
---	-------------

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
2	Objetivos e justificativas	14
3	Revisão da Literatura	15
	3.1 Compressor de Turbojato	15
	3.2 Aspectos Mecânicos	17
	3.3 Fratura em Materiais Metálicos	21
	3.4 Mecanismo de Fratura	24
	3.5 Análise de Falha	26
4	Plano de trabalho e cronograma	29
5	Materiais e Métodos	30
	5.1 Análise Visual e Registro Fotográfico	30
	5.2 Análise Fractográfica.....	31
6	Resultados e Discussões.....	32
	6.1 Análise Visual e Registro Fotográfico	32
	6.2 Análise Fractográfica.....	35
7	Conclusões	42
8	Referências	43

1 Introdução

“Fratura” é um termo utilizado quando uma peça ou componente perde sua integridade física e torna-se incapaz de exercer sua função, sendo indesejável na totalidade dos casos quando a peça ainda está dentro do seu período de vida útil. A fratura pode estar atrelada a diversos fatores como erros de projeto e/ou fabricação da peça, falta de manutenção, localização do equipamento em condições ambientais inadequadas, sobrecarga, combinação destes e outros fatores, e etc. [1].

Além da inoperatividade do equipamento, a fratura também pode comprometer a segurança, trazendo a possibilidade de ocorrência de acidentes. Casos como o colapso dos navios Liberty durante a segunda guerra mundial (anos 40), nos Estados Unidos, e queda dos aviões Comet, nos anos 50, são exemplos de falhas catastróficas que marcaram a história.

Por isso a importância da análise de falha. A análise de falha é um trabalho investigativo realizado após a ocorrência da fratura do material e que objetiva determinar a causa raiz da fratura para prevenir a repetida ocorrência em peças semelhantes em casos futuros. Para tal, são realizados registros fotográficos e análises técnicas em microscopia óptica e eletrônica, que permitem deduzir o(s) mecanismo(s) de propagação de trincas da peça fraturada [2].

A necessidade deste trabalho se consiste em realizar a análise de falha de um compressor de turbojato que teve todas as suas palhetas fraturadas durante a etapa de ensaios mecânicos laboratoriais realizados antes da aplicação da peça no produto final a ser operado. Com a determinação da causa raiz por meio de métodos técnicos-científicos será apresentada uma proposta de rota de processamento da peça afim de que este evento não seja repetido em casos futuros.

Contextualizando a peça a ser analisada, esta seria aplicada em mísseis desenvolvidos nacionalmente. Para realizar o voo o míssil conta com um motor composto basicamente por dois elementos: compressor e turbina. O compressor tem a função de introduzir e comprimir o ar para queima do combustível que ocorre na turbina. Dessa forma, o conjunto promove o empuxo necessário para garantir a performance durante a operação de voo do produto [3].

2 Objetivos e justificativas

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo determinar a causa raiz da fratura das palhetas que compunham um compressor metálico aeronáutico que falhou quando submetido aos ensaios mecânicos exigidos antes de sua aplicação e propor uma medida de melhoria de processamento para evitar a falha e possibilitar a aplicação da peça em serviço. Para tal, será realizada a análise de falha do compressor fraturado, submetendo-o a um registro fotográfico inicial (conforme recebido) e análise fractográfica, que embasam a determinação do tipo de mecanismo de propagação da falha que culminou na fratura.

Os objetivos específicos são:

- Determinação da causa raiz da fratura;
- Proposição de melhoria de processo para evitar falhas repetidas.

3 Revisão da Literatura

3.1 Compressor de Turbojato

A peça a ser considerada como objeto de análise de falha é um compressor de turbojato, utilizado no ramo aeronáutico. O compressor a ser analisado compõe um motor aeronáutico que possui mercado ascendente na economia brasileira, principalmente no que se diz respeito a turbojatos destinados a equipar mísseis de cruzeiro, drones-alvo e veículos aéreos não tripulados [4]. Este é ilustrado pelas Figuras 1 e 2 abaixo.

Figura 1 - Desenho esquemático dos estágios que compõem o compressor.



Fonte: POLARISTEC, 2014 [5].

Figura 2 – Estágio do compressor a ser analisado no presente trabalho.



Fonte: POLARISTEC, 2014 [5].

Em razão do sigilo industrial, a liga e o processo de fabricação da peça não são divulgados, contudo, componentes de motores semelhantes aplicados no setor aeronáutico são de ligas de alumínio fabricados por meio do processo de fundição e usinagem [6].

As ligas de alumínio são convencionalmente classificadas como ligas fundidas e trabalháveis e a diferença entre essas classes está na forma de processamento do material para obtenção do produto. Na primeira, o material é fundido e solidificado em moldes cuja geometria é semelhante ao do produto final ou obtém-se lingotes a serem reprocessados. Já na segunda, o material é conformado a frio, isto é, abaixo da temperatura de recristalização, por meio da deformação plástica obtida através de esforços mecânicos. Podem-se citar os processos de laminação, extrusão e trefilação como exemplos [7 - 9]. Na Tabela 1 estão classificadas as ligas de alumínio fundidas e trabalháveis de acordo com os elementos majoritários, além do alumínio, presentes nas mesmas.

Tabela 1 - Classificação das ligas de alumínio fundidas e trabalháveis.

Ligas de Alumínio Fundidas		Ligas de Alumínio Trabalháveis	
Série	Elementos de Liga	Série	Elementos de Liga
1XX.X	Alumínio com pureza acima de 99%	1XXX	Alumínio com pureza acima de 99%
2XX.X	Cobre	2XXX	Cobre
3XX.X	Silício e Cobre e/ou Magnésio	3XXX	Manganês
4XX.X	Silício	4XXX	Silício
5XX.X	Magnésio	5XXX	Magnésio
7XX.X	Zinco	6XXX	Magnésio e Silício
8XX.X	Estanho	7XXX	Zinco
9XX.X	Outros Elementos	8XXX	Estanho

Fonte: KVALCO, 2011 [10].

No que se diz respeito ao processo de fundição e usinagem de compressores, primeiramente o metal líquido é vertido para o interior da cavidade do molde e durante o resfriamento e solidificação os cristais nucleiam e crescem [11]. Dessa forma, obtém-se uma peça bruta a qual é posteriormente processada por meio da usinagem de forma a atender os requisitos geométricos da peça final.

É válido citar os defeitos mais recorrentes advindos do processo de fundição, sendo eles: poros, trincamentos e inclusões. A porosidade da peça metálica é consequência da absorção de gases atmosféricos pelo metal líquido durante o processo de fundição ou então pela oclusão de ar no molde preenchido com metal líquido [12]. Já as trincas térmicas são geradas quando há um acentuado gradiente de temperatura entre a superfície da peça e o seu núcleo durante o processo de solidificação, o qual promove tensões residuais que culminam na formação de microtrincas e trincas ao longo da extensão da peça [13]. Inclusões são formadas quando há falta de controle da composição química de liga fundida ou então para casos em que a solidificação ocorre em moldes de areia, há a possibilidade de contaminação do metal líquido com sílica [14].

A usinagem é definida como um processo mecânico de remoção de material da camada superficial da peça por meio do cisalhamento. A parte removida é denominada cavaco e, no caso do alumínio, este pode ser reaproveitado pois é 100% reciclável. Além disso, as variáveis de processo influenciam no acabamento superficial do produto e definem a sua resistência mecânica em determinada solicitação, uma vez que o carregamento apresenta um perfil de intensidade o qual é máximo na camada superficial do objeto. Caso a peça apresente um acabamento superficial de baixa qualidade, isto é, com perfil de rugosidade muito disperso e angular, estes defeitos superficiais atuam como concentradores de tensão e são potenciais sítios de nucleação de trincas durante a solicitação mecânica do produto, o levando à fratura [15 - 17].

3.2 Aspectos Mecânicos

Na vasta área da mecânica, um elemento metálico finito, seja ele um equipamento, uma máquina, um eixo, etc., que esteja sob esforços estáticos e/ou dinâmicos durante sua aplicação está sujeito à deformação dada pela variação da geometria inicial deste elemento. Vale ressaltar que esta deformação pode ser reversível (elástica) ou irreversível (plástica) a depender do modo e intensidade que o elemento é solicitado mecanicamente [18].

Esforços estáticos são gerados a partir da aplicação de uma carga externa ao elemento a uma taxa de deformação constante, como por exemplo o que ocorre durante um ensaio de tração [19]. A deformação neste caso se inicia com o estiramento das ligações atômicas do material e é reversível, ou seja, a partir do momento que a carga for retirada o material retorna a sua condição inicial. Esta deformação é denominada elástica e ocorre abaixo do limite de escoamento do

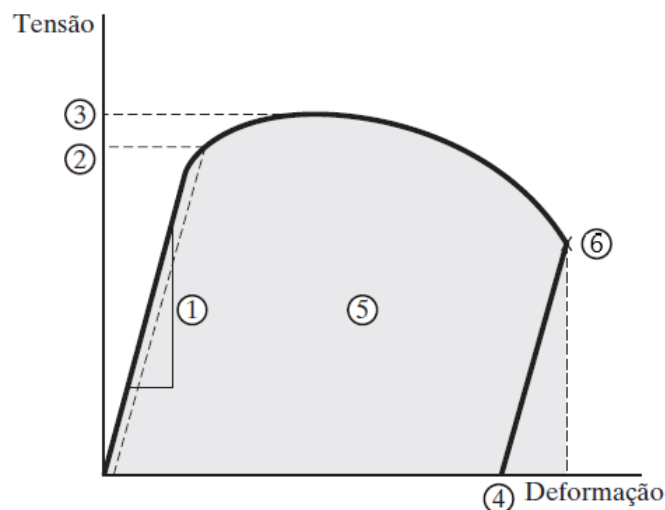
material, seguindo o comportamento linear da Lei de Hooke, conforme observado no item 1 da Figura 3 [20].

À medida que o material é solicitado mecanicamente, este atinge o limite de escoamento definido como a tensão mínima necessária para que haja a ruptura das ligações metálicas e o deslizamento irreversível dos planos cristalinos ao longo a estrutura do material. O limite de escoamento está representado pelo item 2 da Figura 3. A partir deste ponto o material metálico passa a se deformar plasticamente [21, 8].

Neste momento, a movimentação e interação de defeitos pontuais, lineares, planares e volumétricos passam a reger, ao mesmo tempo, a deformação do metal sendo a movimentação de discordâncias, classificada como um defeito linear, a iniciadora e propagadora principal da deformação plástica. O movimento conservativo sucede quando a discordância se movimenta no mesmo plano de deslizamento cristalino, sendo este o de maior densidade atômica. Por outro lado, o movimento não conservativo é realizado quando há um obstáculo na rede cristalina, como por exemplo a presença de um composto intermetálico, um contorno de grão, entre outros defeitos que impedem a movimentação da discordância no mesmo plano de deslizamento. Dessa forma, a discordância se move fora do plano de deslizamento, demandando energia para tal [8].

À medida que a deformação plástica é promovida por meio do deslizamento de planos cristalinos e movimentação de discordâncias, esta torna-se cada vez mais difícil por conta da elevada complexidade de interação entre defeitos cristalográficos, que atuam como barreiras energéticas. Nesta situação, o material começa a ser encruado, ou seja, adquire resistência mecânica a frio e isto é revelado entre os pontos 2 e 3 da Figura 3 [22]. O encruamento é aumentado conforme a deformação plástica se propaga uniformemente ao longo do material, ou seja, cada vez mais a movimentação de discordâncias se torna comprometida, até o atingimento do limite de resistência à tração dado pelo item 3 da Figura 3. Após este ponto, a área de seção transversal do corpo de prova metálico é reduzida devido ao fenômeno de estricção ou “empescoçamento” e a tensão requerida para promover a deformação plástica é decrescente passando a se concentrar na região de estricção, acarretando na fratura dada pelo item 6 da Figura 3 [23]. Os itens 4 e 5 da Figura 3 se referem a ductilidade do material e tenacidade, respectivamente.

Figura 3 - Diagrama tensão – deformação de engenharia típico de metais.



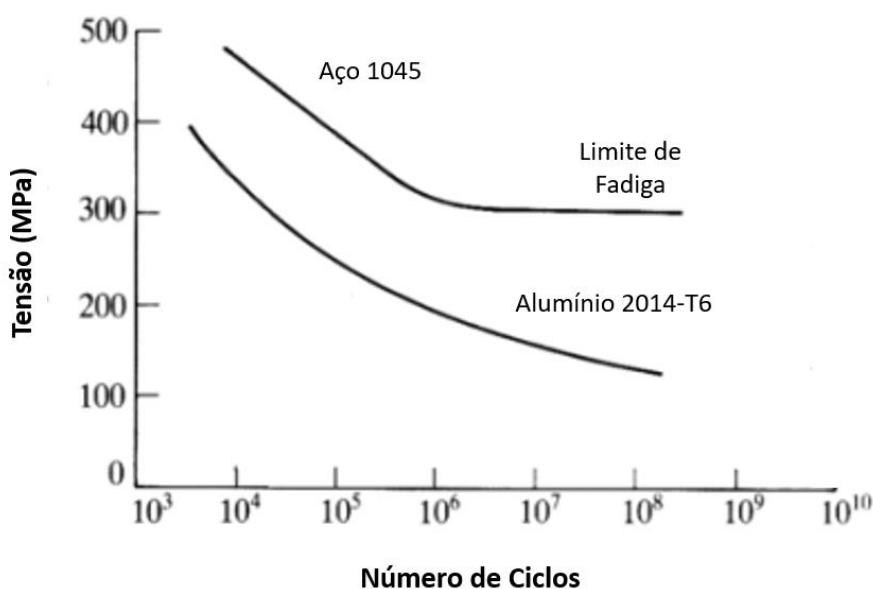
Fonte: Adaptado de SHACKELFORD, 2008 [20].

Diferentemente dos esforços estáticos exemplificados pelo ensaio de tração mencionado anteriormente, os esforços dinâmicos são gerados quando uma carga externa é aplicada sobre o elemento a uma taxa de deformação variável, como por exemplo o que ocorre durante um ensaio de fadiga [23]. Vale ressaltar que para o ensaio dinâmico é possível a ocorrência da fratura abaixo do limite de escoamento do material e de maneira repentina e catastrófica, sendo a falha por fadiga a de maior ocorrência (50 a 90% dos casos). A vantagem da simulação do comportamento mecânico de materiais por meio de ensaios dinâmicos frente a ensaios estáticos é a maior confiabilidade dos resultados para projeção de peças no que se diz respeito aos requisitos mecânicos [24].

Como a solicitação mecânica num ensaio dinâmico é diferente do estático, sendo o carregamento neste caso cíclico, o comportamento mecânico do material é completamente diferente nestas duas situações. Neste aspecto, pode-se observar o comportamento da curva tensão *versus* número de ciclos (em escala logarítmica) característica do ensaio de fadiga, ilustrada na Figura 4. Uma série de corpos de prova são ensaiados a uma tensão cíclica que decresce progressivamente de maneira que cada ponto da curva seja respectivo a um conjunto amostral do número de ciclos suportado àquela tensão empregada durante o ensaio. Geralmente, os corpos de prova são inicialmente submetidos a uma tensão cíclica correspondente a $\frac{2}{3}$ da tensão de tração do material. Quando o comportamento linear da curva é observado, diz-se que o limite de resistência

à fadiga foi atingido o qual representa a tensão máxima para não ocorrência da falha por fadiga em um número infinito de ciclos, isto é, quando uma tensão inferior a este limite for aplicada no material, este não falhará por fadiga. Para materiais ferrosos este se dá próximo a 10^6 ciclos já para ligas de alumínio, por apresentar-se indefinido conforme a Figura 4, recorre-se ao método de Basiquin [21, 23, 25]. Vale ressaltar que na prática, o material pode estar sob efeito de outros agentes externos como temperatura, atmosfera, entre outros, o que pode acarretar numa fratura abaixo do limite de resistência não justificado pelo ensaio de fadiga realizado em condições ideais. Dessa forma, entende-se que as falhas que culminam na fratura ocorrem de maneira singular e podem ser consequência de um ou vários fenômenos combinados os quais o material é submetido.

Figura 4 - Curva S-N: Representação da vida em fadiga de um material metálico.



Fonte: Adaptado de NOGUEIRA, 2014 [26].

A fadiga ocorre devido à propagação infinitesimal de trincas da superfície para o interior da seção transversal do componente devido a flutuação do estado de tensões do material que o compõe dada pelo carregamento cíclico ou dinâmico, variável ao longo do tempo [27]. De maneira geral, as trincas são nucleadas devido a presença de defeitos superficiais concentradores de tensão, como entalhes ou irregularidades no perfil de rugosidade, ou pelo surgimento de pequenas descontinuidades (degraus) na superfície do material solicitado mecanicamente, denominadas

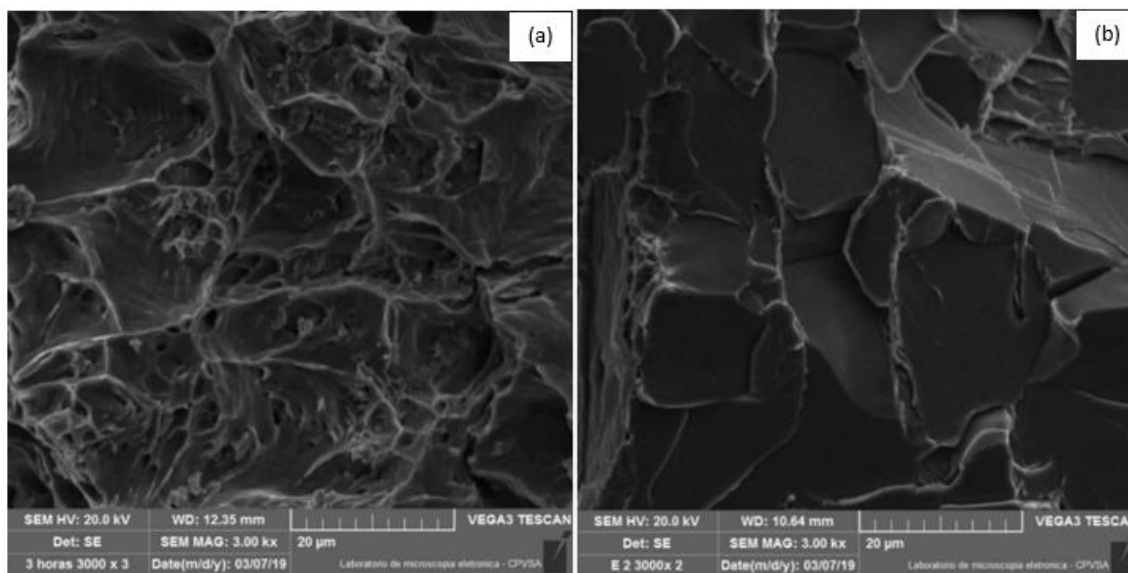
intrusões e extrusões, que são geradas pela interpolação de diferentes sistemas de deslizamento da rede cristalina conforme progresso da deformação plástica. À medida que o componente é solicitado e o número de ciclos aumenta gradativamente, a trinca se propaga de maneira perpendicular à direção de aplicação da tensão, partindo da superfície para o interior do material, deixando estrias na superfície de fratura visíveis pela técnica de microscopia eletrônica. Por fim, a área de seção transversal do material é reduzida e quando a trinca atinge um tamanho crítico, esta se propaga de maneira incontrolável gerando o dano permanente do componente, a fratura, o inviabilizando. Vale ressaltar que a fratura ocorre por sobrecarga à uma tensão de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ do limite de resistência a tração do material [23, 28-30].

3.3 Fratura em Materiais Metálicos

A fratura é o resultado irreversível de uma falha e envolve a nucleação e propagação de trincas ao longo da extensão do material solicitado mecanicamente, de maneira estática ou dinâmica [30]. Existem 3 tipos clássicos de fratura em materiais metálicos: dúctil, frágil e mista, quando apresenta ambos os aspectos.

A fratura dúctil está atrelada a uma intensa deformação plástica e é típica em metais com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), pois esta promove a maior probabilidade de deslizamento de planos cristalinos uma vez que contém planos de maior densidade atômica. A região de fratura possui um aspecto fibroso resultante da grande deformação plástica sofrida pelo material, conforme Figura 5 (a). Vale ressaltar que para este tipo de fratura, como a deformação plástica é acentuada, há uma complexa e forte interação entre os defeitos existentes na estrutura cristalina do material os quais promovem a formação de microcavidades no seu interior. Tais microcavidades são denominadas “*dimples*” e à medida que o material é solicitado mecanicamente, estas coalescem gerando trincas que se propagam rapidamente por meio de esforços cisalhantes, ao longo do material e em direção à superfície externa, levando à fratura final [30].

Figura 5 - (a) Fratura dúctil do aço SAE 1020 recozido; (b) Fratura transgranular do aço SAE 1020.

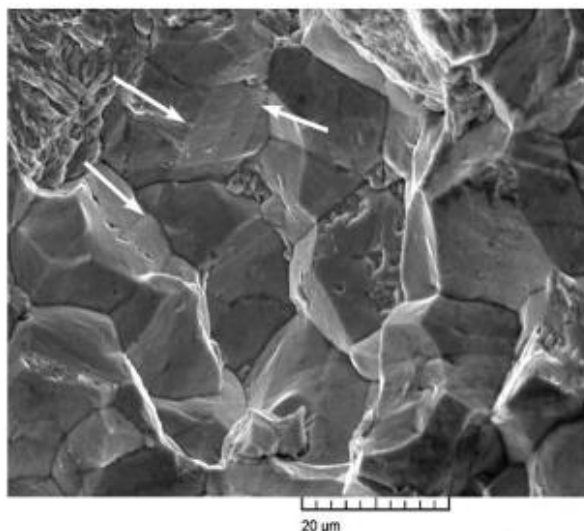


Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2019 [31].

Já a fratura frágil é caracterizada pelo seu aspecto liso, conforme ilustrado pela Figura 5 (b), e advém de uma rápida propagação de microtrincas e trincas em um material solicitado mecanicamente, sem grandes deformações plásticas. Este tipo de fratura é típico de metais com estrutura hexagonal compacta (HC), uma vez que esta possui poucos sistemas de deslizamento. Vale ressaltar que a propagação de trincas que culminam na fratura frágil pode se dar através do grão gerando uma fratura transgranular, conforme Figura 5 (b), com uma textura facetada e com vários planos de clivagem, ou ao redor do contorno de grão, gerando uma fratura intergranular, conforme Figura 6 [21, 30].

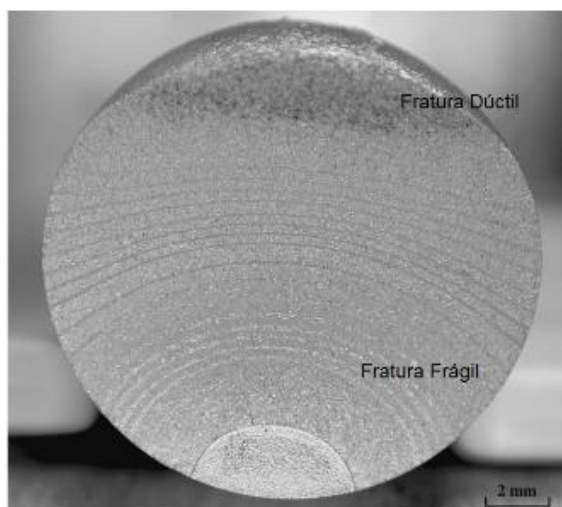
Materiais dúcteis, como por exemplo ligas de alumínio, que fraturam no limite de resistência à fadiga geralmente apresentam uma superfície de fratura com ambos os aspectos: liso e fibroso, isto é, a região correspondente à nucleação e propagação das trincas por fadiga fratura de forma frágil e o restante dado pela região de seção reduzida resistente do material fratura de maneira dúctil, envolvendo grandes deformações plásticas. Para este caso, a fratura é denominada mista e é ilustrada pela Figura 7. É válido ressaltar que a fratura da seção reduzida resistente também pode se dar de maneira frágil a depender do material e solicitação mecânica. A exemplo, tem-se materiais de estrutura cristalina HC ou casos de fratura em baixo ciclo.

Figura 6 - Fratura intergranular do aço 1050.



Fonte: CLARKE, 2008 [32].

Figura 7 - Fratura mista do aço inox AISI 304 após ensaio de fadiga.



Fonte: SHIN, 2004 [33].

É válido ressaltar que a fratura é única para cada elemento, isto é, mesmo que dois elementos tenham a mesma composição química e sejam ensaiados ou aplicados nas mesmas condições estes terão superfícies de fraturas diferentes. Isso se deve ao fato de existirem diversos parâmetros como: de processo, acabamento de superfície, distribuição de defeitos cristalinos na

rede, entre outros, que interferem nos mecanismos de deformação e propagação de trincas ao longo do material, que culminam na fratura.

3.4 Mecanismo de Fratura

Para justificar as evidências obtidas por meio da análise de falha e então determinar o motivo pelo qual levou o material perder sua integridade, é fundamental o conhecimento técnico na área da mecânica da fratura. A propriedade mecânica do material que é mais relevante dentro deste contexto é a tenacidade. Esta propriedade é definida como a capacidade do material armazenar energia advinda de um agente externo sem se romper [20]. A energia é armazenada na estrutura cristalina do metal que quando atinge a sua saturação, passa a deformar plasticamente o mesmo. Desta forma, pode-se correlacionar a tenacidade com a ductilidade do material, sendo estas propriedades diretamente proporcionais [10]. Logo, materiais com maior tenacidade, ou seja, com maior quantidade de mecanismos e possibilidades de deslizamento que promovem a deformação plástica, possuem maior resistência à fratura uma vez que as trincas são propagadas de maneira dificultada. Quantitativamente, a energia de ativação para deformação plástica é menor que a energia necessária para rompimento de ligações químicas da estrutura cristalina do material, relacionada a energia envolvida para propagação da trinca. Dessa forma, a energia recebida externamente por um esforço mecânico da peça é transferida em maior parte para deformação plástica do material, por ter menor energia de ativação [34].

É válido ressaltar que muito se investe em mecanismos de tenacificação da microestrutura do material que compõe peças e equipamentos que sofrem grandes solicitações mecânicas, justamente para dificultar o processo de propagação de trincas ao longo do material. A exemplo, pode-se citar a indústria de cerâmicas refratárias, que são materiais extremamente frágeis se comparados aos metais. No caso dos refratários, a propagação das trincas torna-se comprometida pela presença de defeitos na microestrutura do material como poros, maiores tamanhos de grão (maior área superficial do contorno de grão), presença de fase líquida, agregados, etc. Tais defeitos agem como barreiras energéticas que consomem a energia necessária para a propagação da trinca. Como consequência, o material torna-se mais tenaz e adquire maior resistência à fratura [35].

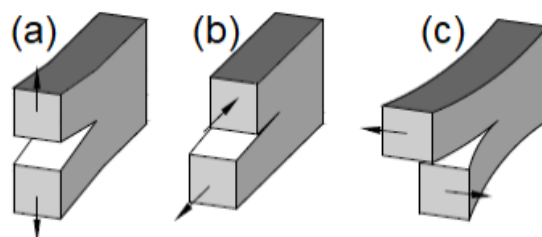
A mecânica da fratura é o ramo que justifica e prevê potenciais falhas de materiais. Para análise de falha, o seu conhecimento teórico e prático é fundamental uma vez que por meio da

mecânica da fratura é possível determinar se uma trinca de uma dada dimensão existente na microestrutura do material poderá se propagar quando este está sob carregamento e que conseqüentemente o levará a ruptura catastrófica. Dessa forma, pode-se estabelecer o fator de segurança que um determinado componente, peça ou equipamento deve conter para evitar a ocorrência de uma possível falha por fratura frágil [36].

Tratando-se de trincas, estas são nucleadas em pontos concentradores de tensão e propagadas ao longo do material solicitado mecanicamente. Para a propagação, deve-se prover de energia suficiente para rompimento de ligações químicas da estrutura cristalina do material e formação de superfícies. Este foi o embasamento termodinâmico de Griffith em 1920 para formular o mecanismo de fratura de materiais frágeis, não aplicável para muitos materiais metálicos [34].

Posteriormente, nos anos 60, Paris e Erdogan relacionaram a taxa de propagação da trinca com o fator de intensidade de tensão (K), o qual a depender do material possui um valor crítico para propagação instável da trinca, culminando na fratura catastrófica do material. É válido ressaltar que para determinação da tenacidade à fratura de uma peça ou equipamento metálico, o mesmo é submetido a um ensaio mecânico segundo a norma ASTM E399 a qual define 3 modos distintos de carregamento da amostra, ou a combinação destes, ilustrados pela Figura 8 abaixo. No modo I, representado pela letra (a), a trinca é submetida à esforços trativos os quais representam majoritariamente o mecanismo de propagação de trincas em componentes de engenharia. Já o modo 2, representado pela letra (b), a trinca se propaga sob esforços de cisalhamento no mesmo plano da trinca e no modo III, representado pela letra (c), sob esforços de rasgamento, cisalhamento fora do plano que contém a trinca [34, 37].

Figura 8 - Modos de carregamentos e propagação de trincas.



Fonte: Adaptado de MARTINS, 2014 [37].

3.5 Análise de Falha

Uma falha pode ser definida e compreendida em diversos níveis dentro de uma indústria e na área de engenharia. No mais básico, a falha é representada pelos déficits operacionais de um elemento/equipamento que opera, mas que não atinge seus níveis de excelência. Num nível intermediário, a falha de um elemento/equipamento pode levar à perda de vida útil do mesmo, ou seja, este consegue operar, contudo num prazo menor que o estipulado havendo a necessidade de manutenção e até mesmo possíveis trocas. Já no nível avançado, a falha pode acarretar riscos ao ambiente em que o elemento/equipamento está localizado e este torna-se inoperante, pois fratura [2]. A análise de falha vem justamente para investigar o modo e os processos envolvidos na propagação da falha e determinar a sua causa raiz para mitigar futuras ocorrências de fraturas. Esta metodologia contém algumas atividades listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Atividades envolvidas numa análise de falha.

Atividades envolvidas numa análise de falha	
1	Coleta de dados e amostras
2	Exame preliminar da peça que falhou
3	Seleção e limpeza da superfície de fratura
4	Exame macroscópico (1 a 100x) da superfície de fratura
5	Exame microscópico (> 100x) da superfície de fratura
6	Aplicação dos conceitos de metalurgia mecânica/mecânica da fratura
7	Conclusão e elaboração do relatório

Fonte: Adaptado de SHACKELFORD, 2008 [20].

O processo de investigação da falha requer um alto senso de criticidade, detalhamento de informações e conhecimento técnico. Este se inicia com a coleta de informações e amostras da peça que sofreu a fratura. Ter o conhecimento do cenário em que a peça se encontrava antes de fratura é fundamental para a conclusão do trabalho. Dessa forma, é importante atentar-se quanto ao modo e intensidade dos esforços os quais a peça estava sendo solicitada, como estava disposta no local, as condições ambientais (temperatura, umidade, atmosfera, etc) no qual se encontrava, e assim por diante. Posteriormente, realiza-se uma inspeção visual e registo fotográfico da peça recebida e para

realização de análises técnicas, as amostras são devidamente limpas para que impurezas como óleo, óxidos, particulados, entre outros, não atrapalhem a visualização da superfície de fratura. É feita então a análise da superfície de fratura de forma macro e microscópica, com auxílio do estereomicroscópio e/ou MEV, e com isso é possível observar os mecanismos de iniciação e propagação da falha, os quais culminam na fratura. Demais técnicas, como por exemplo a análise microestrutural, servem como complemento às informações referentes ao mecanismo de falha e são de extrema importância para correta conclusão do caso. Em mãos de dados e informações das análises técnicas realizadas, aplica-se o conteúdo teórico da metalurgia mecânica e mecânica da fratura para determinar a causa raiz da falha, além de justificar como o material falhou, e quais ações podem ser tomadas a fim de evitar-se a repetida falha em casos futuros [20].

É válido ressaltar que a falha de um componente advém de fatores internos ou externos que promovem a propagação de trincas e microtrincas ao longo do material e possuem aspectos: mecânicos, químicos, térmicos, elétricos, a combinação destes, dentre outros [2]. Dessa forma, é possível observar tamanha complexidade do tema e a importância do conhecimento técnico para interpretação dos dados provenientes das análises a serem realizadas. Podem-se exemplificar os fatores mecânicos como uma sobrecarga estática e/ou dinâmica fora do limite admitido pela peça, impactos e atritos decorridos da operatividade do equipamento, tensões residuais internas do material que compõe a peça derivadas de seu processamento, dentre outros. Fatores químicos como a atmosfera do ambiente em que a peça está exposta, problemas de compatibilidade de materiais dissimilares, efeitos corrosivos. Fatores térmicos como a exposição do material em elevadas temperaturas possibilitando a transformação de fase, degradação térmica, crescimento de grão, ou o contrário, a exposição a temperaturas inferiores à transição dúctil-frágil do material que promove o comportamento frágil do mesmo [10, 23].

As razões de falha são inúmeras, sendo as mais comuns derivadas do mau uso do equipamento, manutenção inadequada, erros de montagem e erros de manufatura da peça [39]. A falha devido ao mau uso do equipamento pode ser exemplificada pela submissão do equipamento à níveis de esforços incompatíveis ao projetado, sendo assim, a deformação torna-se mais acelerada e consequentemente a nucleação e propagação de trincas também. Quando esta situação se combina ao fato do equipamento estar localizado numa região com concentrações maiores de agentes oxidantes, o processo de corrosão é inevitável e torna-se mais acelerada a propagação de trincas, como no caso de um trem de pouso que falhou numa tensão de aproximadamente 100MPa abaixo

do projetado [39]. Já a falta de manutenção do equipamento, como por exemplo a falta de lubrificação, pode gerar atrito e desgaste da peça, o que também promove a deformação do material, surgimento de riscos e pontos concentradores de tensão sendo estes sítios preferenciais de nucleação de trincas. A exemplo, pode-se citar o caso da falta de grafite nos pantógrafos de um metrô, o levando à fratura [39]. Erros de montagem estão atrelados a união de peças diferentes por meio de parafusos, rebites, soldas, adesivos, etc. Estes pontos de união são considerados pontos concentradores de tensão uma vez que a transmissão de esforços não é efetiva devido à anisotropia da peça. Em especial, o processo de soldagem envolve mecanismos de fusão e solidificação do metal, além de possivelmente alterar a microestrutura da região termicamente ativada, sendo assim um provável ponto de nucleação de trincas [39]. Por fim, erros de manufatura se traduzem em defeitos de processamento os quais a peça é submetida e que geram concentradores de tensão. A exemplo, pode-se citar a usinagem utilizada para realização de furos e acabamento superficial da peça através da remoção de material. Neste processo, tensões residuais são geradas na superfície do material pelo encruamento e perfil de rugosidade. Vale ressaltar que a camada superficial sofre a maior solicitação do carregamento e sob um esforço dinâmico, a fadiga pode ser um mecanismo de falha que culmina na fratura do material [15].

4 Plano de trabalho e cronograma

Para realização da parte prática do projeto, ao longo de 4 meses, foi seguido o cronograma de atividades apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Cronograma das atividades.

Descrição das Atividades	Mês			
	1	2	3	4
1 Revisão bibliográfica				
2 Registro fotográfico da peça				
3 Análise fractográfica				
4 Escrita do TCC				

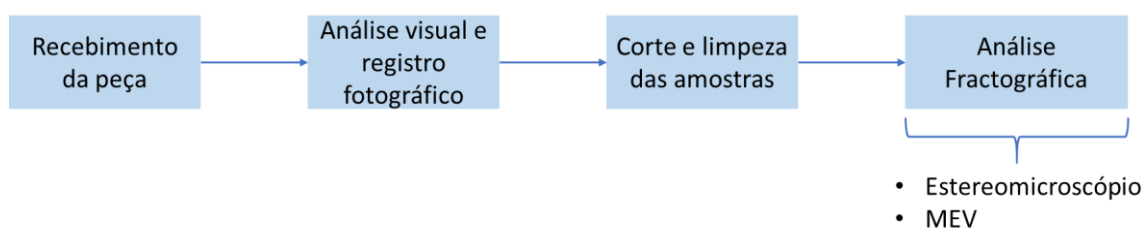
Fonte: Elaboração própria.

5 Materiais e Métodos

O fluxo dos métodos que foram utilizados na parte experimental do projeto está ilustrado na Figura 9. Primeiramente, o compressor de turbojato passou por uma etapa de inspeção visual e registro fotográfico no Laboratório de Metalografia da UNIFESP, unidade Parque Tecnológico. Posteriormente, foram cortadas amostras da peça original as quais foram limpas em ultrassom e posteriormente submetidas à análise fractográfica.

Para investigação do mecanismo de falha, as superfícies de fratura da peça foram analisadas em estereomicroscópio, no Laboratório de Metalografia da UNIFESP, unidade Parque Tecnológico, e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com formação de imagem por elétrons secundários, no Laboratório de Caracterização Microestrutural, Microscopia Eletrônica e Difractometria de raios-X da UNIFESP, unidade Talim.

Figura 9 - Fluxograma das atividades experimentais.



Fonte: Elaboração própria.

5.1 Análise Visual e Registro Fotográfico

Inicialmente foi realizada a inspeção visual do compressor de turbojato com devida iluminação. Foram procurados na superfície da peça pontos de descontinuidade como trincas, poros, diferenças de tonalidade, riscos, rebarbas de processo e outras possíveis evidências de falha. Tais descontinuidades foram fotografadas por uma câmera de 12 Mp e resolução de 4608 x 2592 pixel, acoplada a um celular iPhone 8. Também foram registradas imagens da peça como um todo, conforme recebida. Posteriormente, foi realizado um exercício de correlação da descontinuidade com o mecanismo de fratura afim de auxiliar na determinação da causa raiz da falha da peça.

5.2 Análise Fractográfica

Amostras da base da palheta, correspondentes a região da ocorrência da fratura da peça, foram cortadas com um serrote manual e posteriormente limpas para análise da superfície de fratura. A limpeza foi realizada submetendo as amostras em um banho em ultrassom ALTSonic Clean com solução de acetona, durante o tempo necessário para limpeza completa da superfície. Para averiguar a eficácia da limpeza da superfície, a mesma foi seca com auxílio de um secador e analisada em estereomicroscópio Feldmann Wild Leitz modelo FWL SMZ 7.5.

Com a amostra devidamente limpa, a superfície de fratura foi analisada de maneira macro e microscópica, por meio de um estereomicroscópio Feldmann Wild Leitz modelo FWL SMZ 7.5 com aumentos de 16 e 20 vezes e microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca FEI modelo INSPECT S50, considerando a formação da imagem por elétrons secundários e aumentos de 19, 124 e 1200 vezes.

Para análise no estereomicroscópio, a amostra foi posicionada abaixo do conjunto de lentes do equipamento e em um suporte adequado. A luminosidade foi corrigida de forma a favorecer a visualização dos indícios do mecanismo de fratura e foram registradas imagens. Aumentos maiores não foram registrados visto que a superfície de fratura apresenta uma topografia irregular e que conseqüentemente dificultar o foco da imagem e sua interpretação. Dessa forma, para complementação dos resultados as superfícies de fratura das amostras também foram analisadas com maior ampliação no microscópio eletrônico de varredura. As condições de trabalho foram de 15 KV e 20 kV com distância de trabalho variando de 11,8 mm a 39,66 mm.

6 Resultados e Discussões

6.1 Análise Visual e Registro Fotográfico

Na figura 10 observa-se a imagem do compressor de turbojato fraturado. Com a análise visual da peça objetivou-se identificar e registrar fotograficamente suas descontinuidades em nível macroscópico. Tais descontinuidades destacadas nas Figuras 11 e 12, serão discutidas a seguir e corroboram para a determinação da causa raiz da falha. É válido ressaltar que somente a análise visual não é suficiente para determinação do mecanismo de falha uma vez que se limita à pequenas ampliações sendo necessária a utilização da microscopia para complementação das análises e conclusões mais assertivas.

Figura 10 – Compressor de turbojato conforme recebido.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme ilustra a Figura 10, a peça era composta por um corpo cilíndrico metálico com palhetas ao longo de toda sua extensão radial as quais foram fraturadas durante ensaios mecânicos realizados antes da aplicação da peça em campo. A peça possui dimensões médias de 20 cm de diâmetro e 22 cm de altura e as palhetas da carreira superior, as quais duas amostras foram obtidas para análise fractográfica, possuem 4,3 cm de comprimento.

Na Figura 11 evidenciam-se algumas descontinuidades superficiais da peça, destacadas pelas setas amarelas. Na seta 1, está evidenciada na base da palheta fraturada uma trinca a qual é paralela ao plano de superfície de fratura. Vale ressaltar que a superfície apresenta uma diferença de perfil topográfico, com picos e vales e é única para cada palheta fraturada. Já a seta 2 destaca a rugosidade superficial existente na peça derivada do processo de usinagem a qual a peça é submetida durante o processo de manufatura.

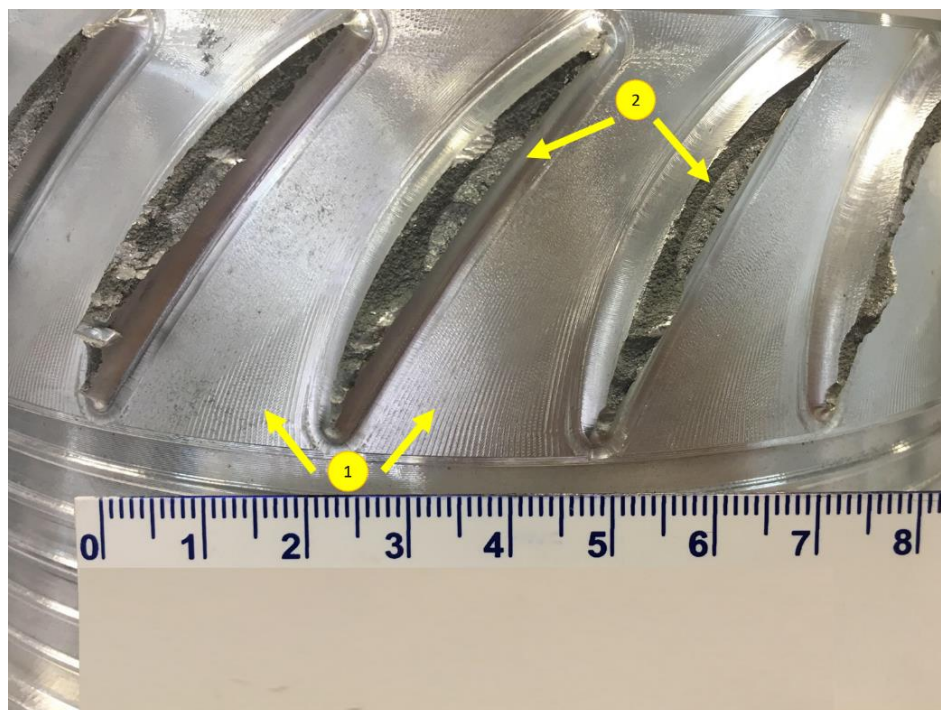
Figura 11 – Análise visual do compressor de turbojato.



Fonte: Elaboração própria.

Já na Figura 12, as setas 1 novamente destacam a rugosidade existente ao longo da superfície da peça a qual se estende inclusive para região superficial das palhetas. Outra descontinuidade observada é destacada pelas setas 2 em que é possível identificar uma diferença de tonalidade na superfície de fratura das palhetas a qual possui uma região mais clara num formato elíptico e a área restante com uma tonalidade mais escura.

Figura 12 – Superfícies de fratura.



Fonte: Elaboração própria.

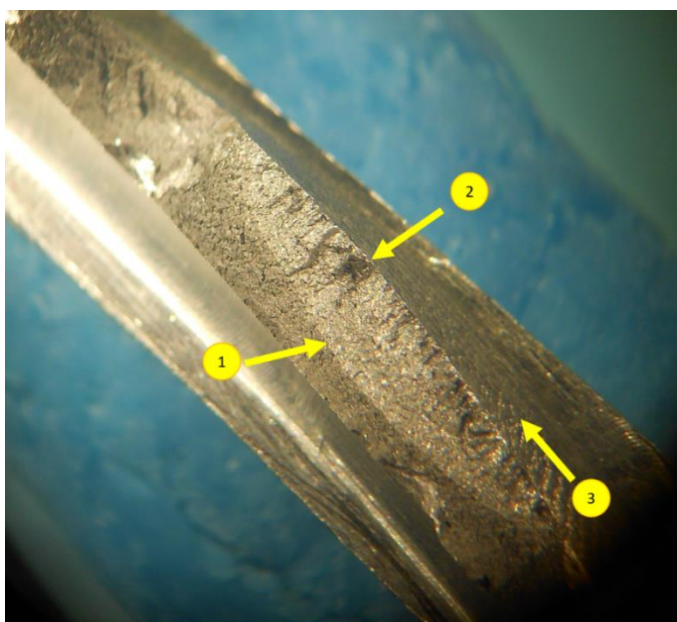
O fato da peça possuir um acabamento superficial com elevada rugosidade justifica a existência de trincas na superfície do material no sentido de atuar como concentrador de tensão e facilitador de nucleação de trincas na superfície da peça, tal item é ilustrado pela Figura 11.

Para maior detalhamento da análise de falha e justificativa da diferença de tonalidade na região superficial da fratura, duas amostras de palhetas fraturadas foram analisadas em estereomicroscópio e MEV para se complementar as evidências do mecanismo de fratura. O próximo tópico abordará os resultados e discussões da análise fractográfica dessas amostras.

6.2 Análise Fractográfica

Duas amostras de palhetas foram cortadas da peça original para análise fractográfica em estereomicroscópio e MEV. A Figura 13 ilustra a superfície de fratura de uma das amostras a qual foi obtida por meio de um registro em estereomicroscópio e apresenta destaques a serem discutidos a seguir.

Figura 13 – Superfície de fratura da palheta, analisada por estereomicroscópio.



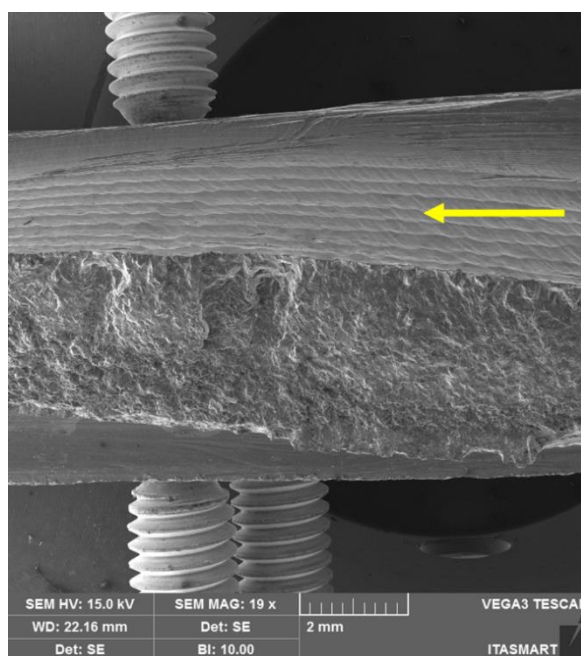
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 13 tem-se a superfície de fratura da palheta aumentada em 16x com destaques indicados pelas setas amarelas. Novamente, como evidencia a seta 1, é possível visualizar a diferença de tonalidade entre uma região e outra da superfície. O segundo item destacado é o provável ponto de nucleação da trinca. Nesta região, é razoável que as trincas tenham sido nucleadas pela presença de defeitos superficiais os quais agiram como concentradores de tensão e sítios preferenciais de nucleação de trincas. A partir deste ponto, as trincas se propagam em direção ao centro da palheta até que a seção de resistência não suporte mais a solicitação mecânica, fraturando o material. Por fim, na terceira seta é possível visualizar como é dado o acabamento da superfície externa da palheta, a qual também é usinada como o corpo metálico do compressor de

turbojato. As irregularidades evidenciadas são defeitos superficiais críticos que afetam negativamente a vida em fadiga.

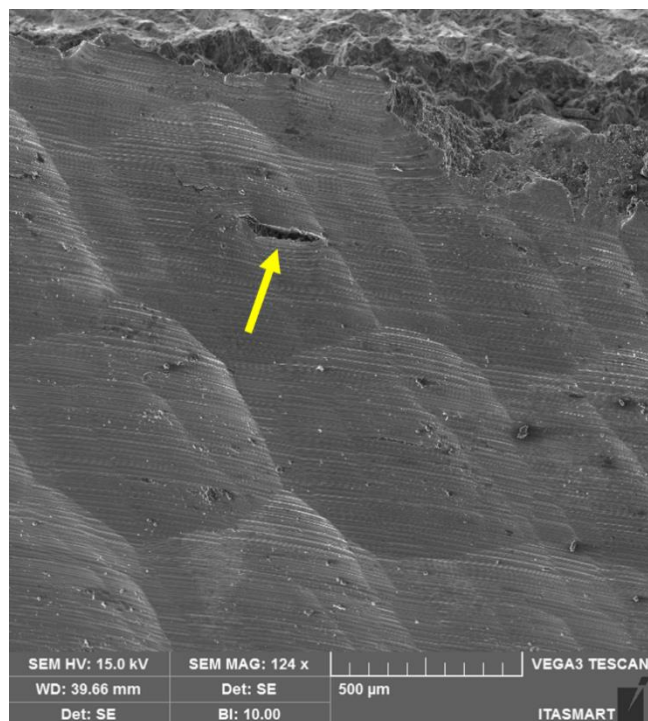
Vale ressaltar que as amostras apresentavam uma topografia de fratura acentuada o que compromete a qualidade dos registros em microscópio óptico, dado pela limitação da própria técnica de formação de imagem. Dessa forma, para maiores ampliações e resoluções, as amostras foram analisadas em MEV, como ilustra as Figuras 14, 15 e 16.

Figura 14 – Superfície de fratura da palheta, obtida via MEV.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 15 – Acabamento superficial da palheta fraturada.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 – Estrias de fadiga.



Fonte: Elaboração própria.

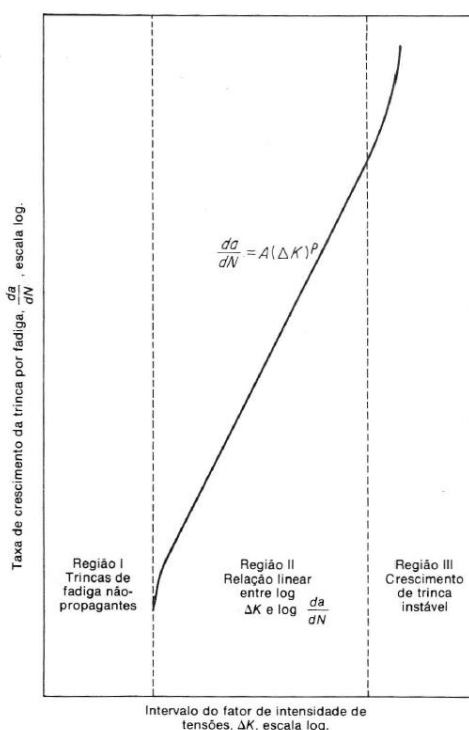
Fica evidente nas Figuras 14 e 15 que a superfície metálica usinada apresenta uma irregularidade periódica ondulada a qual é a causa raiz da falha do componente metálico aeronáutico. A rugosidade permite que o processo de nucleação e propagação de trincas seja facilitado uma vez que não há necessidade do material deformar-se plasticamente e formar intrusões e extrusões na superfície do material para que então seja nucleada e propagada uma trinca [40]. Outro ponto é que durante a solicitação mecânica do material, o carregamento de forças apresenta um perfil de intensidade o qual é máximo na superfície da peça. Dessa forma, a região superficial está sujeita a maiores esforços e qualquer defeito e irregularidade atua como um concentrador de tensão e sítio preferencial para nucleação e propagação de trincas [15]. Além disso, na Figura 15, é possível observar uma trinca originada justamente na região concentradora de tensão, destacada pela seta amarela.

Salienta-se que o mecanismo de falha que levou a fratura das palhetas da peça foi por fadiga visto que se tem evidências de marcas de praia, conforme observado na Figura 12, e estrias, conforme destacadas na Figura 16. Vale ressaltar que a diferença de tonalidade na superfície de fratura do material, visível macroscopicamente, é dada pelas marcas de praia e consequência das diferentes taxas de propagação da trinca a qual varia durante a solicitação mecânica. Além disso, as estrias de fadiga, visíveis microscopicamente, correspondem a um ciclo de carga cada uma e a distância entre duas estrias também relacionada com a taxa de propagação da trinca [30].

A falha por fadiga é caracterizada pela curva ilustrada na Figura 17 a qual possui 3 estágios que contemplam o processo de nucleação de trincas, propagação e ruptura final. A curva é dada pela relação existente entre $\frac{da}{dN}$ (taxa de incremento no comprimento da trinca por ciclo de carga) e ΔK (diferença entre os valores máximos e mínimos do fator de intensidade de tensões) conforme a equação I abaixo. A e p são constantes empíricas que dependem do material, condições de ensaio, ambiente e temperatura [30].

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^p \text{ (Equação I)}$$

Figura 17 – Estágio de propagação de trincas por fadiga.



Fonte: DIETER (1981) [30].

Tomando um estado de tensão uniaxial, no estágio I são nucleadas trincas que crescem por modo cisalhante ao longo de planos de deslizamento orientados a aproximadamente 45° do eixo de tensão. Nesta etapa, a taxa de propagação da trinca é decrescente uma vez que o material passa a se deformar plasticamente à medida que é solicitado mecanicamente, gerando as estrias de fadiga, e adquire resistência mecânica pelo encruamento. Fatores como superfície de acabamento e microestrutura do material são extremamente sensíveis neste contexto. No estágio II, a trinca começa a se propagar na direção perpendicular ao eixo de tensão de tração. Nesta situação a taxa de propagação da trinca é constante e este estágio corresponde ao trecho mais extenso da fadiga. Por fim, no estágio III a trinca alcança um tamanho o qual a seção reduzida resistente torna-se incapaz de sustentar a carga de tração máxima aplicada. Portanto, a fratura final é por sobrecarga, uma vez que a tenacidade do material é excedida. Neste caso a taxa de propagação da trinca é crescente, o que leva ao crescimento rápido e instável da trinca e a ruptura catastrófica do material. É válido ressaltar que nesta região a superfície de fratura possui um aspecto dúctil (fibroso, irregular e com presença de *dimples*) [30].

Ademais, tendo o conhecimento da causa raiz da falha é fundamental que seja proposta uma solução para correção dos defeitos de acabamento superficial da peça usinada, e, portanto, a prevenção de falhas semelhantes em casos futuros. Vale ressaltar que o método de produção e manufatura do compressor é sigiloso, contudo, componentes de motores semelhantes aplicados no setor aeronáutico são de ligas de alumínio fabricados por meio do processo de fundição e usinagem já consolidados no mercado aeronáutico. Na usinagem, a peça é “esculpida” do bloco metálico obtendo-se o “*blisk*”, derivado de “*bladed disk*” que significa “disco de pás” e tem-se a vantagem da obtenção de uma peça única, sem a necessidade de unir as partes pelos processos de soldagem ou rebiteagem que são críticos e evitados para aplicações que possuem solicitações mecânicas como no caso de motores [6, 41, 42]. Neste contexto, destaca-se o processo de *shot peening* da peça usinada como etapa subsequente ao processo de usinagem e obtenção do “*blisk*” que contribui para aumento da vida em fadiga da peça.

O *shot peening* é uma das metodologias de jateamento com excelente custo x benefício e definida como um tratamento superficial mecânico a frio e se consiste em submeter a peça metálica a um jato de partículas com elevado grau de esfericidade (geometria S) que promovem o encruamento superficial do metal além de gerar tensões residuais compressivas de distribuição uniforme ao longo da região que variam entre 70 a 80% do limite de escoamento do material. Tais fatores tendem a aumentar a vida em fadiga visto que dificultam o processo de nucleação de trincas na superfície externa da peça [43, 44]. Conforme ilustra a Figura 18, com a colisão das partículas, a superfície metálica é deformada plasticamente na tendência de alongamento a qual é responsável por encruar o metal e induzir uma força interna de reação que promove a formação das tensões residuais compressivas [45].

Figura 18 – Superfície metálica após realização do shot peening.



Fonte: MIC (2006) [46].

É válido ressaltar que existem parâmetros de processo que podem interferir na eficácia do tratamento superficial, sendo eles: composição, granulometria e grau de esfericidade das partículas; ângulo, distância, pressão e velocidade do jato; tempo de exposição. Tais parâmetros podem ser variados a depender da geometria da peça, de sua composição, entre outros, contudo o parâmetro de intensidade do jato é padronizado desde 1943, data a qual J. O. Almen desenvolveu o medidor de Almen sendo este o mais efetivo instrumento para controle em produção industrial do *shot peening*. Dessa forma, a técnica começou a ser empregada de maneira padronizada e em larga escala no setor industrial [45].

7 Conclusões

Desta forma, conclui-se que o compressor de turbojato falhou por fadiga devido à rugosidade superficial existente na peça a qual atuou como concentrador de tensão facilitando a nucleação de trincas na superfície externa das palhetas, que por meio da solicitação mecânica, propagaram-se para o interior do material, o deformando plasticamente e reduzindo sua seção resistente, até a fratura final. O defeito superficial foi originado durante a manufatura do componente metálico aeronáutico, no processo de usinagem.

Como alternativa para prevenção da ocorrência da falha e de menor impacto ao processo produtivo tradicional de manufatura de peças metálicas aeronáuticas, a aplicação da metodologia de jateamento *shot peening* após o processo de usinagem se mostra muito eficiente uma vez que atua no sentido de aumentar a resistência mecânica superficial da peça, pelo encruamento, e induzir tensões residuais de compressão que dificultam o processo de nucleação e propagação de trincas por fadiga.

8 Referências

- [1] WULPI, D. J. **Understanding How Components Fail**. 2 Ed. Ohio: ASM International, 1999.
- [2] **Failure Analysis and Prevention**, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, 2002.
- [3] Agência Nacional de Aviação Civil, **ANACpédia**. Disponível em: <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_esp/tr1790.htm>. Acesso em: 29 de maio de 2020.
- [4] TRIMBLE, S. LAAD: Start-up brasileira revela o primeiro turbojato do país. **Flight Global**, 2013. Disponível em: <<https://www.flightglobal.com/laad-brazilian-start-up-unveils-countrys-first-turbojet/109355.article>>. Acesso em: 22 de junho de 2020.
- [5] **Polaristec**. Disponível em: <<https://www.polaristec.com.br/index.html>>. Acesso em: 22 de junho de 2020.
- [6] SOUZA, E. **Estudo comparativo para fabricação de peças aeronáuticas: Forjamento x Usinagem**. 2015. Monografia de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- [7] SOUSA, M. N. **Influência das propriedades mecânicas das ligas de alumínio na usinabilidade – foco no grau de recalque, na dimensão da zona de fluxo e na microdureza dos cavacos**. 2013. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [8] REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.
- [9] GARCIA, A. **Solidificação – Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. Campinas: Editora Unicamp, 2001.
- [10] KAVALCO, P. M. **Caracterização de material composto de matriz metálica a partir de uma liga de alumínio aeronáutico reciclado**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [11] SILVA, P. H. E. **Influência da liga Al-Ti na estrutura de solidificação de uma peça fundida**. 2015. Monografia (Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [12] LEVY, R. S. **Análise de porosidade em alumínio com adição de celulose**. 2018. Monografia (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava.
- [13] OLIVEIRA, B. F. **Fundição**. 1. Ed. Belém: Rede e-Tec Brasil, 2013.

- [14] SANTANA, A. S. **Identificação dos principais defeitos de fundição através da aplicação de ferramentas da qualidade: estudo de caso em uma fundição de peças metálicas**. 2016. Monografia (Engenharia de Produção) - Faculdade Católica Salesiana do Espírito Santo, Vitória.
- [15] LOPES, K. S. S. **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [16] SEGATIN, R. L. **Uma contribuição à melhoria do processo de fresamento em 5 eixos de pás de turbinas hidráulicas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [17] GAMBONI, O. C. **Estudo do efeito do ambiente no comportamento em fadiga de novas ligas de Al de grau aeronáutico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [18] HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [19] BEER, J. et al. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- [20] SHACKELFORD, J. F. **Introdução à Ciência dos Materiais para Engenheiros**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [21] CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [22] PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. 1. ed. Curitiba: Hemus, 2000.
- [23] SOUZA, S. A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.
- [24] ZOLIN, I. **Ensaaios mecânicos e análises de falhas**. 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2011.
- [25] SILVA, M. C. **Vida em Fadiga da Liga de Alumínio AA7175-T1**. 2001. Trabalho de Iniciação Científica – Fundação Educacional Inaciana, São Bernardo do Campo, São Paulo.
- [26] NOGUEIRA, R. M. **Máquina de testes de fadiga mecânica por flexão rotativa**. 2014. Projeto Final de Graduação (Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [27] ROSA, E. **Análise de resistência mecânica de peças e componentes estruturais**. 1. ed. Santa

Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

[28] DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**. 4. ed. England: Pearson, 2013.

[29] MEYES, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

[30] DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.

[31] OLIVEIRA, D. A. **Influência do Tempo de Recozimento sobre a Recristalização e Tenacidade ao Impacto de um Aço Baixo Carbono**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, Rio Grande do Norte.

[32] CLARKE, C.K.; HALIMUNANDA, D. **Failure Analysis of Induction Hardened Automotive Axles**. Journal of Failure Analysis and Prevention, v. 8, p. 386 – 396, 2008.

[33] SHIN, C. S; CAI, C. Q. **Experimental and finite element analyses on stress intensity factors of an elliptical surface crack in a circular shaft under tension and bending**. International Journal of Fracture, Taiwan, v. 129, p. 239–264, 2004.

[34] ROCHA, D. L. **Revisão Bibliográfica Sobre os Critérios de Falha Segundo a Ótica da Mecânica da Fratura, em Especial, o Desenvolvimento da Curva de Resistência dos Materiais (Curva R)**. 2009. Monografia: Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

[35] CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic Materials - Science and Engineering**. Springer, 2007.

[36] NISHIDA, S. I. **Failure Analysis in Engineering Applications**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.

[37] MARTINS, P. A. F.; BAY, N.; TEKKAYA, A. E.; ATKINS, A. G. **Characterization of fracture loci in metal forming**. International Journal of Mechanical Sciences, v. 83, p. 112–123, 2014.

[38] GEITNER, F. K.; BLOCH, H. P. **Machinery Failure Analysis and Troubleshooting – Practical Machinery Management for Process Plants**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.

[39] AZEVEDO, C. R. F. **Casos selecionados de análise de falhas**. 1. ed. São Paulo: EPUSP, 2018.

[40] MILELLA, P. P. **Fatigue and Corrosion in Metals**. Milan: Springer-Verlag, 2013.

- [41] UBIRATAN, E. Evolução a jato. **Aero Magazine**, 2014. Disponível em: <https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/evolucao-jato_1498.html>. Acesso em: 22 de junho de 2020.
- [42] SOUZA, G. O. **Fresamento em 5-eixos simultâneos de pás de compressores de turbinas a gás em TiAl6V4**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [43] KIRKHOPE, K. J.; BELL, R.; CARON, L.; BASU, R. I.; MA, K. T. **Weld detail fatigue life improvement techniques**. Part 1: review. *Marine Structures*, v12, 1999, p. 447-474.
- [44] OLIVEIRA, R. R.; LIMA, N. B.; BRAGA, A. P. V.; GONÇALVES, M. **Avaliação da tensão residual em alumínio 7050 conformadas pelo processo peen forming**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 2010.
- [45] Silva, J. J. O. **Efeito do processo de shot peening com diferentes condições de deflexão de almen nos perfis de tensão residual e microdureza e rugosidade em um aço cementado temperado/revenido utilizado na fabricação de engrenagens automotivas**. 2016. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- [46] MIC. **Shot peening applications**. Metal Improvement Company – 9ª ed., 62p. Disponível em: <http://www.metalimprovement.com/premium/PDF/greenbook_v9/english/MIC%20Green%20Book%20-%209th%20edition%20-%20Complete%20Book.pdf>. Acesso em: 22 de janeiro de 2021.